

# 晋陕峡谷北部盘塘-黑峪口地区黄河阶地 序列及其形成年代

刘运明<sup>1,†</sup> 李有利<sup>2</sup> 周葆华<sup>1</sup>

1. 安庆师范学院资源与环境学院, 安庆 246133; 2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; † E-mail: npknnn@163.com

**摘要** 野外考察发现, 陕西省神木县盘塘至山西兴县黑峪口黄河两岸发育四级第四纪河流阶地, 阶地前缘基座出露, 与现今黄河河面高差分别为 12, 50, 80 和 130 m。四级阶地上覆盖厚度不等的黄土层, 其厚度在 T1 阶地上最大约为 20 m, 在 T2 阶地上约为 33 m, 在 T3 阶地上不同区域黄土厚度不一, 最厚处约为 37 m, 在 T4 阶地上黄土层厚度最大, 约为 43 m。分别对 T2 阶地、T3 阶地和 T4 阶地上河流相砂层进行电子自旋共振(ESR)测年样品采集。ESR 测年结果显示, T2 阶地的形成时代约为 0.609 Ma, T3 阶地的形成时代约为 0.876 Ma, T4 阶地的形成时代为  $0.97 \pm 0.107$  Ma。为了与测年结果相互印证, 对 T3 和 T4 阶地上的黄土进行磁化率和古地磁样品的采集。古地磁结果显示, T3 阶地上的黄土底层未能到达 B/M 界限, 说明黄土层底部年龄不超过 0.78 Ma, 比河流相砂层的 ESR 测年结果更年轻。T4 阶地黄土底部年龄约为 1.07 Ma, 与 ESR 测年结果的差别在 ESR 测年的误差范围内。四级阶地在形成年代上与兰州以及三门峡地区的阶地可以对比, 说明构造运动控制的河流阶地在黄河中上游地区普遍存在。作为对之前工作的补充, 对区域内一级第三纪阶地重新进行古地磁采样和测试, 并结合四级第四纪阶地, 对黄河在该区的侵蚀速率进行探讨。

**关键词** 河流阶地; 黄河; 形成年代

**中图分类号** P931

## Terrace Sequences and Their Formation Ages in Pantang-Heiyukou Area, Northern Shanxi-Shaanxi Gorge, China

LIU Yunming<sup>1,†</sup>, LI Youli<sup>2</sup>, ZHOU Baohua<sup>1</sup>

1. School of Resources and Environment, Anqing Normal University, Anqing 246133; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871; † E-mail: npknnn@163.com

**Abstract** Based on field work, four Quaternary terraces are found according to overlapped loess sequences at Pantang-Heiyukou area and its surroundings in northern Chinese Shanxi-Shaanxi Gorge. These four terraces, which are 12, 50, 80 and 130 m above present the Yellow River level respectively, are all rock-seated terraces. The thicknesses of overlapped loess from the lowest terrace to the highest Quaternary terrace are about 20, 33, 37 and 43 m respectively. ESR dating samples were collected from river sediments on T2, T3 and T4. ESR dating result reveals that the formation ages of these three terraces are 0.609, 0.876 and  $0.97 \pm 0.107$  Ma in turn from T2 to T4. In order to corroborate the dating results, powder samples and oriented samples were collected from sections on T3 and T4. Paleomagnetic result shows that section bottom on T3 does not reach the boundary of B/M (Brunhes/Matuyama), which means a formation age younger than 0.78 Ma. This age is younger than that gotten from ESR dating. The bottom age of T4 section reaches an age of 1.07 Ma, which is a bit older than ESR dating result but within its range. The formation ages of the terraces are in accord with other terraces in upper and lower reach of the Yellow River such as Lanzhou and Sanmenxia which suggests river terraces controlled by tectonic movement exist universally in the domain of the Yellow River. A Late Tertiary section was resampled and

measured as an improvement to former works. The result is used to discuss the incision rate of different terraces in this region.

**Key words** river terraces; the Yellow River; formation age

河流阶地是河流下切后残存的古河床,是研究河流演化的最直接证据。通过对河流阶地的研究,可以揭示河流的演化史。研究河流演化的关键问题是阶地的定年。地理学家通过广泛的野外调查并借助测年技术,有关黄河中上游地区河流地貌演化的研究已经取得丰硕成果。部分学者以三门古湖的消失作为黄河形成的证据,认为黄河形成于 0.15 Ma 左右<sup>[1]</sup>,贯通三门峡,并且导致邙山黄土快速堆积<sup>[2-3]</sup>。多数地理学者依据其中上游的阶地年代,认为黄河在第四纪的早中期已经形成<sup>[4-8]</sup>。还有部分学者认为黄河形成的年代更早,甚至可以追溯到第三纪的中新世晚期或上新世<sup>[9-11]</sup>。目前用于阶地定年的方法发展很快,种类繁多,可以分为绝对定年和相对定年两类。其中,研究黄河阶地的方法主要有光释光定年<sup>[12-13]</sup>、电子自旋共振(ESR)定年、热释光定年<sup>[14]</sup>、宇宙核素定年<sup>[15]</sup>、砾石钙膜厚度法<sup>[16]</sup>、古地磁定年和古土壤断代等。这些测年方法各有优缺点,也有学者几种方法兼用。

黄河流经黄土高原,黄土自第四纪以来基本上连续堆积。关于黄土的研究目前已经比较成熟,因此利用河流阶地上的黄土序列来研究河流阶地的年代成为一种可靠的方法。目前,利用黄土序列研究黄河阶地的工作目前主要集中在黄河上游的兰州地区、三门峡及其以东地区。这些地区的阶地上黄土堆积厚度大,保存完整。黄河中游山西-陕西交界的晋陕峡谷段主要是深切峡谷,峡谷内河流阶地保存不全,甚至完全缺失。一些阶地虽然得以保存,但残存阶地面积狭小,黄土堆积很薄,无法利用古地磁定年和古土壤断代,因而这些地区的阶地研究主要采用光释光定年和热释光定年<sup>[13]</sup>。由于不同学者采用不同的测年方法,晋陕峡谷内阶地的测年结果差异较大。

## 1 区域概况与阶地序列

晋陕峡谷段黄河北起托克托县河口镇,南至禹门口,自北向南流经黄土高原,全长近 700 km。区域内主要为黄土地貌,地表沟壑纵横,水土流失严重。受禹门口断层控制,晋陕峡谷南部相对高差超过 260 m,北部相对高差不足 80 m,具南部高差大

北部高差小的特征。区域内黄土的堆积厚度也有相似的特征,表现为南部厚北部薄。峡谷南部处于黄土高原的中心地带,黄土最大堆积厚度超过 100 m;北部处于高原边缘地区,黄土最大厚度约为 60 m。

研究区位于黄土高原北部地区山西省兴县的黑峪口村和陕西省榆林市神木县境内的盘塘村(图 1),两村隔河相望,黄河自北向南蜿蜒流经该区。本区在构造上属于鄂尔多斯地块,受河流切割,黄河两岸广泛出露三叠纪砂岩,岩层水平分布,显示区域内没有发生差异构造抬升。在两村所在的黄河两岸,共发现四级被黄土覆盖的第四纪河流阶地和两级晚第三纪阶地。盘塘村附近宽度约 500 m 的废弃古河床上覆盖薄层土壤,经人工筑堤辟为农田,农田与黄河平水期河面的高差仅有 3 m 左右,本文将视其为河漫滩。图 2 给出的河谷横剖面由四级第四纪阶地和一级晚第三纪阶地组成。有关晚第三纪阶地(T5)的形成年代,相关成果已发表<sup>[11]</sup>,考虑到之前的工作不够细致,经重新采样,与四级第四纪河流阶地一起讨论。五级阶地位于峡谷之内,阶地前缘陡峭,基座出露明显,详细特征描述如下。

T1 阶地:为基座阶地,基座与河面高差约 12 m,在黑峪口村以北至寨滩村一带出露明显。阶地上砾石层厚约 4 m,粒径一般不超过 20 cm。大粒径的砾石主要为砂岩,中小粒径的除砂岩砾石外,灰岩砾石也很多。砾石的磨圆度很高,表面光滑,说明经过较长距离的搬运,与区域内其他较高的三级阶地上砾石的特征一致。砾石层之上覆盖马兰黄土,出露厚度为 20 m 左右。由于修建公路,阶地上覆盖的马兰黄土开挖后,发现在砾石层之上约 2 m 的位置有一层古土壤,厚约 1 m。

T2 阶地:为基座阶地,基座距河面高度约 50 m,在陕西神木县盘塘村以北出露最为明显。砾石层厚 3 m 左右,砾石的岩性、粒径和磨圆度等特征与 T1 阶地高度一致。砾石层上覆盖厚约 33 m 的黄土。在一个人工采砂开挖的黄土剖面上,顶部出露 4 层弱古土壤;剖面底部被上部崩塌下来的黄土掩埋,没有见到古土壤。

T3 阶地:为基座阶地,基座拔河高度约为 80 m,在山西一侧的谷坡上保存较好。黑峪口村东,

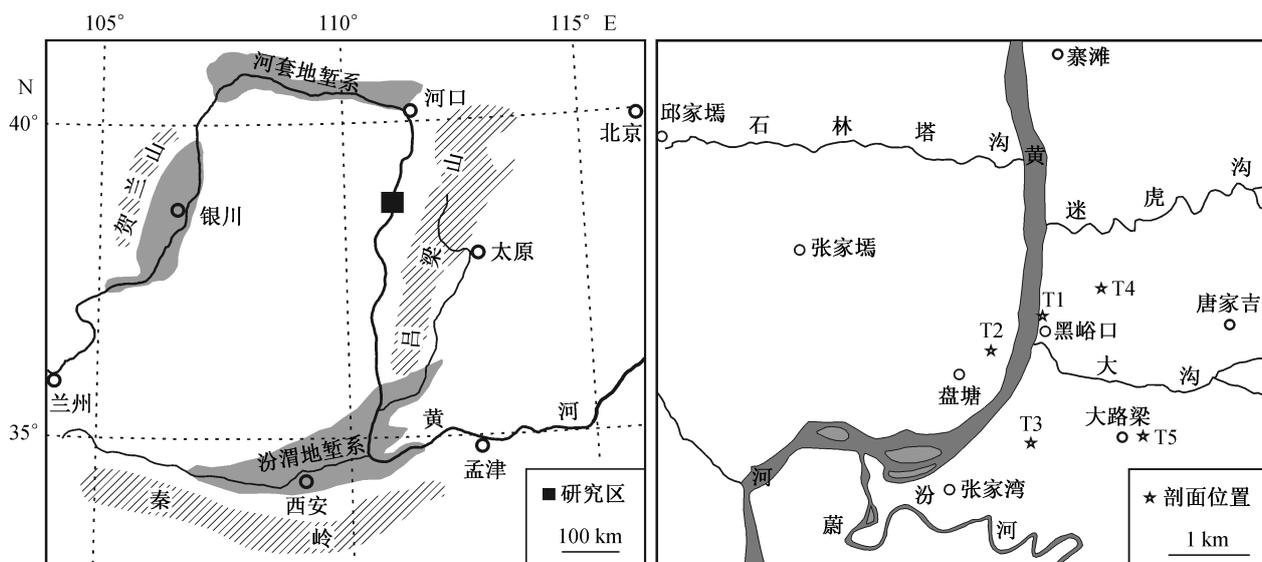


图 1 研究区域和剖面位置  
Fig. 1 The study area and location of studied sections

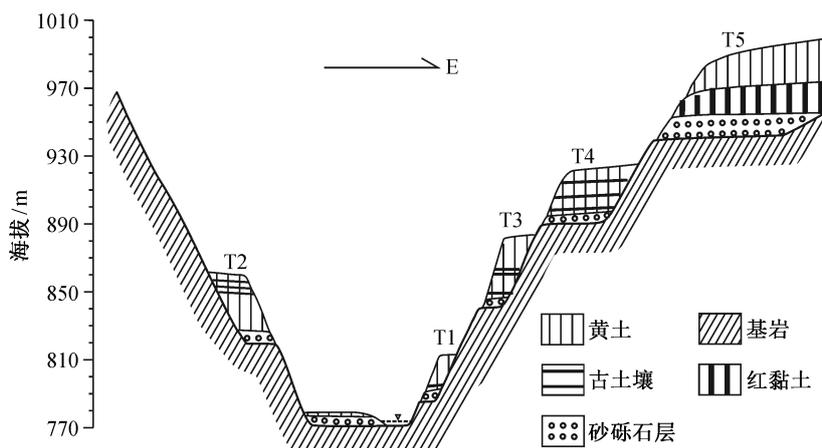


图 2 盘塘-黑峪口地区河流阶地序列  
Fig. 2 Terrace sequence of the Yellow River in Pantang-Heiyukou area

阶地前缘的砾石层较薄，仅保存几十厘米，一些砾石散落在基座上；阶地后缘砾石层厚度增至 2 m，上覆薄层黄土。砾石以砂岩和灰岩为主，粒径一般小于 20 cm，但个别砂岩砾石的粒径可达 45 cm。阶地不同位置黄土覆盖的厚度不一致，沿该阶地向下游追索至张家湾村北，发现厚 37 m 的黄土剖面，剖面上出露厚薄不一的 10 条弱古土壤层。

T4 阶地：为基座阶地，基座拔河高度为 130 m，保存于黑峪口村东的谷坡上部。阶地上不同位置砂砾石层的厚度不一致，一些地方仅出露薄层河流相砂层，一些地方砾石层的厚度可达 3 m。砾石磨圆

度很高，以灰岩和砂岩为主，粒径一般不大于 20 cm，大粒径的砾石主要为砂岩。阶地面比其他三级阶地更宽，宽度可达 200 m 以上，是四级阶地中发育最好的阶地。阶地上覆黄土厚 43 m 以上，遭受不同程度的切割，在地貌上表现为一个个孤立的黄土崩和黄土梁。

T5 阶地：为基座阶地，基座拔河高度约为 170 m，砾石层的最大厚度超过 25 m。特别是在唐家吉村，流水作用致使大量粒径约 5 cm 的砾石组成大型斜层理。阶地上砾石磨圆度极高，表面光滑，以灰岩和砂岩为主，与低阶地上砾石的特征一致。砾石

层之上覆盖厚约 18 m 的风成红黏土层, 因此断定该阶地为晚第三纪阶地。

## 2 采样与实验方法

晋陕峡谷北部盘塘-黑峪口地区五级阶地保存完好, 且阶地面上覆盖厚层黄土和红黏土, 为阶地的相对定年带来方便。我们在 T2 阶地、T3 阶地和 T4 阶地上的河流相细砂层内采集 ESR 测年样品。首先将表层砂土去除至少 50 cm, 露出未受影响的新鲜剖面, 迅速将铁管插进河流相细砂层, 取出充满细砂的铁管并快速用铝箔纸裹口, 缠以胶带固定并编号, 带回实验室备测。考虑到 T1 阶地形成时代较晚, 不太适合用 ESR 定年, 因此没有采集 ESR 定年样品。所有 ESR 样品的测试在国家地震局地质力学研究所完成。

对 T3 阶地上覆盖的黄土采集粉末状磁化率样品, 对 T3 和 T4 阶地上的黄土采集古地磁定向样品。磁化率样品的采样间隔为 10 cm。不同剖面及同一剖面的不同层段, 古地磁定向样品的采样间隔有所不同。对 T3 阶地上的黄土层试探性采集古地磁样品。剖面底部采样间隔小, 以 10~20 cm 为主, 保证不遗漏极性事件; 剖面顶部采样间隔较大, 最大为 2 m。该剖面共获得古地磁样品 33 件。T4 阶地分布面积较广, 黄土堆积时间长, 堆积厚度更大, 受流水侵蚀切割影响, 阶地上黄土支离破碎。对 T4 阶地上一个厚约 43 m 的黄土剖面进行系统的古地磁样品采集, 剖面中下部采样间隔为 10~20 cm, 剖面顶部采样间隔增大到 50 cm, 共获得定向样品 116 件。对 T5 阶地红黏土的磁化率和磁性地层, 我们曾做过研究<sup>[11]</sup>, 采样剖面位于大路梁村北。由于当时对古地磁样品的采集方法不熟练, 对红黏土之上的黄土层采样太少, 仅有一件样品, 缺乏说服力; 黄土与红黏土之间的过渡地层采样数量也较少; 样品退磁温度仅到 600°C, 部分样品的剩磁并未完全清洗。2011 年, 对该剖面进行重新采样, 主要是增加黄土层和过渡层的样品, 共获得有效古地磁样品 77 件。

T3 阶地的粉末样品测试在西南大学地理科学学院利用 AGICO 公司生产的 MFK1-FA 完成。T3, T4 和 T5 阶地的古地磁样品在挪威卑尔根大学地球科学系古地磁实验室完成。T4 阶地的样品, 首先用 MFK1-FA 磁化率仪进行磁化率各向异性测试, 提取磁化率数据, 然后进行热退磁。所有样品的热

退磁都采用 MM60 热退磁仪, 从室温开始, 进行系统热退磁。部分样品一直加热到 680°C, 共 18 步热退磁。剩磁测量采用 2G755 型低温超导磁力仪。

## 3 阶地形成年代

### 3.1 T1 阶地形成时代

由于没有测年数据, 该阶地的年代用古土壤断代确定。T1 阶地上覆厚约 20 m 的黄土底部露出一条古土壤, 古土壤之上的黄土为灰白色, 为晚更新世的马兰黄土, 由此可以确定该古土壤层为 S1, 其下界的形成时代约为 0.129 Ma<sup>[17]</sup>, 可以断定 T1 阶地形成的时代应在 0.129 Ma 之前。

### 3.2 T2 阶地形成时代

T2 阶地上覆厚约 33 m 的黄土层, 在黄土剖面顶部可见 4 条弱古土壤层。我们对该剖面进行过磁化率采样, 由于剖面底部露头不好, 磁化率结果较差, 无法与黄土高原典型剖面(如洛川剖面)进行对比。ESR 测年结果显示, T2 阶地形成于 0.609±61 Ma (表 1)。我们还在 T2 剖面的底部采集少量古地磁样品作为试探样品, 没有反极性样品出现, 也说明该剖面未到达 B/M (Brunhes/Matuyama) 界限。

表 1 盘塘-黑峪口地区不同阶地 ESR 测年结果  
Table 1 ESR dating results of different terraces in Pantang-Heiyukou area

室内编号	阶地编号	样品物质	古剂量/ Gy	年剂量/ (Gy·ka <sup>-1</sup> )	年龄/ ka
6576	HYK-T2	细砂	2701±270	4.43	609±61
6577	HYK-T3	细砂	2200±180	2.51	876±71
6578	HYK-T4	细砂	2106±220	2.16	975±102

### 3.3 T3 阶地形成时代

黑峪口村东的黄河 T3 阶地出露河流相砂层, ESR 测年结果显示, 阶地形成年代为 0.876±0.71 Ma (表 1)。在黑峪口村以南约 3 km 处, 由于修路切坡, T3 阶地上有厚约 37 m 的黄土出露。从该剖面采集的磁化率样品测试结果如图 3 所示, 磁化率曲线存在 4 个较高的峰值区, 其中 3 个距离较近, 最后一个位于剖面底部, 此外还存在一些较小的磁化率峰值, 对应较弱的古土壤。对于这一剖面, 曹新光<sup>[18]</sup>认为, 3 个较高的峰值对应古土壤 S1, 剖面底部的磁化率峰值区对应古土壤 S2。考虑到该剖面存在多条古土壤, 我们认为, 剖面底部的年代应

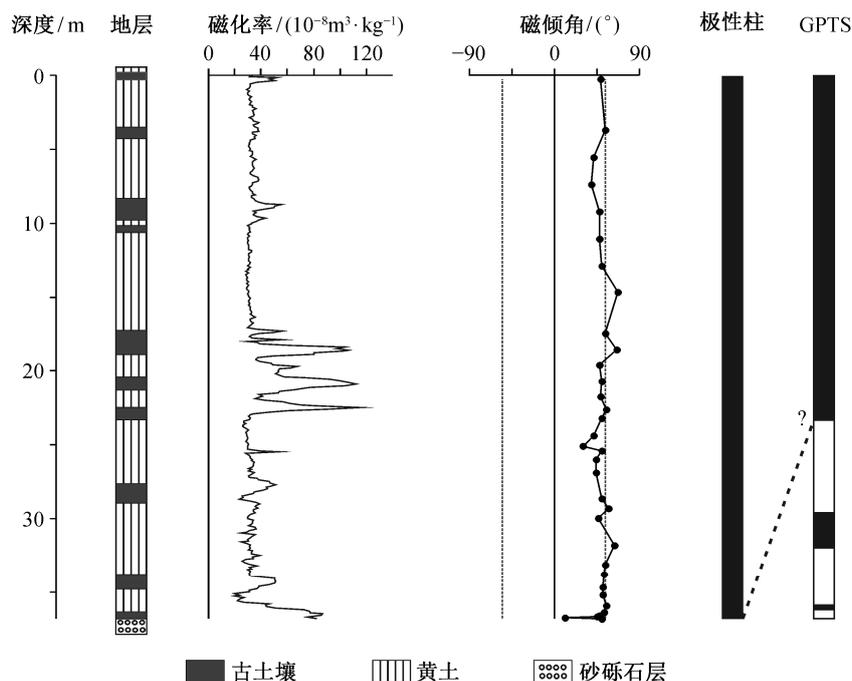


图3 T3阶地磁化率与古地磁结果

Fig. 3 Magnetic susceptibility and magnetostratigraphy of T3 section

该更老一些。古地磁退磁结果(图3)表明,该剖面全部样品都为正极性时,剖面底部未到达B/M界限(0.78 Ma)。这一结果与ESR测年结果略有差异,原因可能有:1)剖面最底部的弱古土壤即为S8(如朱照宇<sup>[19]</sup>认为黄河存在S8古土壤覆盖的阶地),虽然B/M界限位于该古土壤内,但由于该古土壤只残存顶部,未到达B/M界限,因此在该剖面没有采集到反极性时的样品;2)阶地形成后并没有立即堆积黄土,后来由于地形改变等原因,黄土才开始在该阶地上堆积,导致黄土底部年龄小于阶地年龄;3)阶地形成时黄土即开始在阶地上堆积,阶地本身年龄小于B/M界限,ESR测年结果偏差大。可见,T3阶地形成的时代存在不确定性,本文以ESR测年结果为准。

### 3.4 T4阶地形成时代

T4阶地上也保存有河流相砂层,ESR样品测年结果显示,阶地形成年代约为 $0.975 \pm 102$  Ma。野外采样时发现,距离剖面底部7~10m的位置,黄土主要由粉砂层组成,颗粒较其上下层位的黄土粗,胶结程度低,采集的定向样品极易破碎。粉砂黄土在黄土高原上主要有两层,分别为L9或L15<sup>[20]</sup>,该剖面为L9,可以作为一个标志层。磁化率结果和古地磁结果如图4所示。

T4剖面磁化率曲线至少出现9个磁化率峰值区,剖面最上部峰值不明显。磁化率最高值出现在L9粉砂层底部对应的古土壤,按次序该古土壤应为S9。L9之上共有7条古土壤层,缺少一条古土壤,原因可能是顶部黄土和古土壤堆积在黄土岭上,边缘地层向下弯曲,古土壤厚度变小或尖灭。将古地磁的退磁结果与标准极性柱(GPTS)<sup>[21]</sup>进行对比,结果表明,该剖面出现3段正极性时和3段反极性时,其中最顶部近30m的正极性时对应布容正极性时,极性倒转发生于其下的古土壤内。黄土高原的古地磁研究结果表明,B/M界限多位于古土壤S8内<sup>[22]</sup>,可以确定粉砂层之上的古土壤为S8,而粉砂层为L9。在粉砂层L9之内,出现厚度约4m的正极性时,在图4中对应的极性柱用灰色表示。高分辨率古地磁研究表明,黄土高原粉砂层L9内普遍出现正极性时。关于这一正极性时,目前没有达成一致的观点,部分学者认为是一次极性倒转事件,也有学者认为是重磁化现象<sup>[22]</sup>。在距剖面底部约2m的位置出现厚约1m的正极性时,为贾拉米洛事件,该事件的起始年龄为1.07 Ma,结束年龄为0.99 Ma左右<sup>[21]</sup>。由此,T4剖面的形成年代至少可以推至1.07 Ma,这一结果虽然比ESR测年要老,但也基本上位于ESR测年的范围之内。

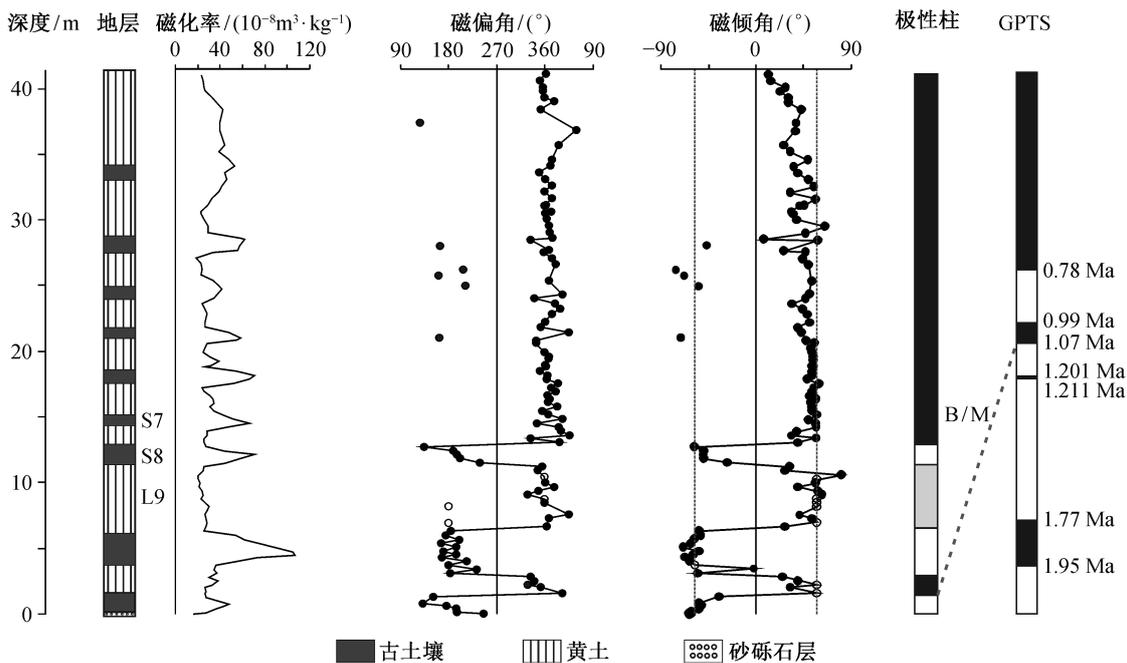


图 4 T4 阶地磁化率与古地磁结果

Fig. 4 Magnetic susceptibility and magnetostratigraphy of T4 section

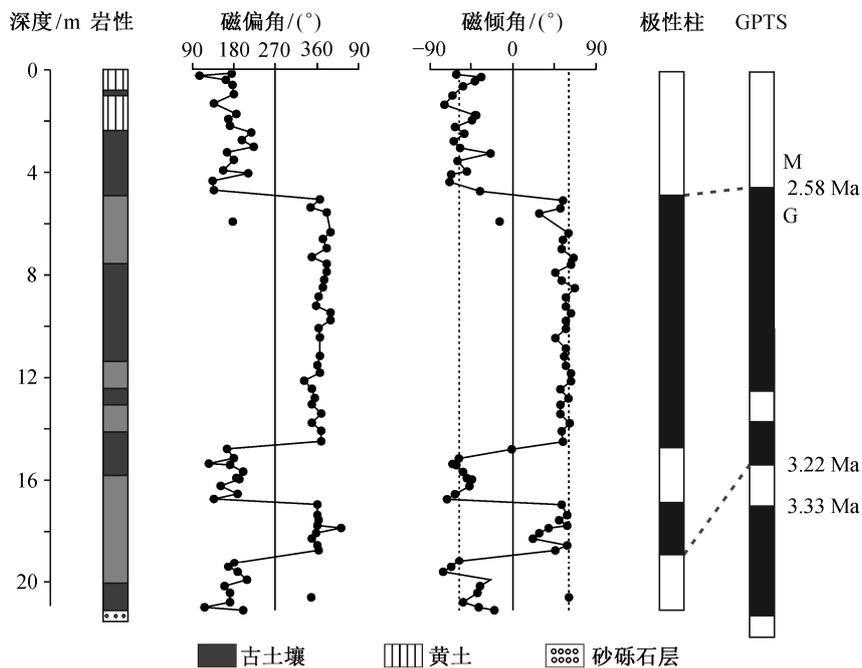


图 5 T5 阶地古地磁测量结果

Fig. 5 Magnetostratigraphy of T5 section and its correlation to GPTS

### 3.5 T5 阶地的形成时代

T5 阶地的古地磁结果如图 5 所示，重新采集的红黏土和黄土样品得到的结果与之前的结果<sup>[11]</sup>一致，共出现 3 段反极性时和 2 段正极性时，松山

反极性时与高斯正极性时的界限(M/G)位于黄土与红黏土之间的过渡层中，剖面底部的形成年代约在 3.3 Ma 左右，表明 T5 阶地至少在 3.3 Ma 之前已经形成。

## 4 讨论与结论

根据以上结果,晋陕峡谷北部盘塘-黑峪口地区的四级第四纪黄河阶地从低到高分别形成于 0.129, 0.609, 0.876 和 1.07 Ma 左右。四级阶地都位于现今晋陕峡谷之内,说明黄河至少在 1.07 Ma 之前已经流经本区,并在这 4 个时间节点开始发生下切,形成四级河流阶地。虽然我们测得的最老的 T4 阶地形成于 1.07 Ma 左右,但这一结果是在最高阶地的前缘测得的,对于阶地面较为宽广的 T4 阶地来说,如果采样剖面靠近阶地后缘,考虑到河流的侧向侵蚀,测年结果可能会更老一些。T5 阶地形成年代约为 3.3 Ma,最近的研究表明,保德和河曲也存在形成年代相近的黄河阶地<sup>[23]</sup>,这就将黄河在晋陕峡谷的形成年代扩展至第三纪晚期。

与盘塘-黑峪口地区四级阶地相对应的阶地在其他地区也广泛发育,如在兰州和三门峡及其以东峡谷地区,都可以找到与四级阶地对应的阶地,甚至在青海的湟水也可以找到相关阶地的踪迹<sup>[23]</sup>。根据各级阶地之间的高差以及阶地开始下切的年代,我们计算了盘塘-黑峪口地区阶地的平均下切速率,并把位于大路梁村附近、形成于 3.3 Ma 左右的晚第三纪阶地 T5 考虑在内。表 2 给出不同阶地间的高差、年代差和平均下切速率。计算表明,从 T4 至 T3 阶地,河流下切速率最快,达到 258 mm/ka; T3 至 T2 阶地,下切速率次之; T2 阶地之后,河流下切速率变化不大;下切速率最慢的是从 T5 至 T4 阶地,即从晚第三纪至 1.07 Ma。由此可见,黄河从晚第三纪至 1.07 Ma 期间经历了一个漫长的稳定期,1.07 Ma 以后,受黄河运动的影响<sup>[4]</sup>,发生急剧下切,导致晋陕峡谷的形成,其中又以 1.07~0.6 Ma 这一时段下切速率最快。

一般来讲,阶地的形成与构造运动、气候变化

和侵蚀基准面的升降有关。本研究区距离海洋较远,且黄河流经汾渭地堑系等地质构造复杂区域,阶地的形成不可能是由海面升降控制的侵蚀基准面的变化引起的。此外,四级阶地既有形成于冰期的,也有形成于间冰期的,且阶地上沉积物未见沉积旋回,因此也不大可能是气候原因造成的<sup>[24-25]</sup>。因此,四级阶地的形成基本上可以归结为构造运动的结果。研究区基底为三叠系砂页岩,至今保持水平产状,说明研究区内没有发生差异抬升,阶地的形成可能与青藏高原阶段性隆升影响下鄂尔多斯地块的整体抬升有关<sup>[26]</sup>。晋陕峡谷北部地区的四级阶地与兰州和三门峡等地区的阶地在形成时间上相近<sup>[27-29]</sup>,不仅说明区域构造隆升的同时性,也说明当时构造运动影响的广泛性。

致谢 国家地震局地壳动力研究所尹功明研究员测试 ESR 样品,挪威卑尔根大学地球科学系已故 Reidar Lovlie 教授生前在古地磁退磁技术和数据处理方面给予指导,西南大学硕士研究生刘伟、孙强一参加野外考察和采样工作。在此一并致谢。

## 参考文献

- [1] 王苏民,吴锡浩,张振克,等. 三门古湖沉积记录的环境变迁与黄河贯通东流研究. 中国科学: D 辑, 2001, 31(9): 760-768
- [2] Jiang F C, Fu J L, Wang S B. Formation of the Yellow River, inferred from loess-paleosol sequence in Mangshan and lacustrine sediments in Sanmen Gorge, China. *Quaternary International*, 2007, 175: 62-70
- [3] Zheng H B, Huang X T, Ji J L. Ultra-high rates of loess sedimentation at Zhengzhou since Stage 7: implication for the Yellow River erosion of the Sanmen Gorge. *Geomorphology*, 2007, 85: 131-142
- [4] 李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 1-11
- [5] 潘保田,王均平,高红山,等. 河南扣马黄河最高级阶地古地磁年代及其对黄河贯通时代的指示. 科学通报, 2005, 50(3): 255-261
- [6] 岳乐平,雷祥义,屈红军. 黄河中游水系的阶地发育时代. 地质论评, 1997, 43(2): 186-192
- [7] 邢成起,丁国瑜,卢演铸,等. 黄河中游河流阶地的对比及阶地系列形成中构造作用的多层次性分析. 中国地震, 2001, 17(2): 187-201
- [8] Sun J M. Long-term fluvial archives in the Fen Wei Graben, central China, and their bearing on the tectonic history of the India-Asia collision system

表 2 盘塘-黑峪口地区河流阶地下切速率

Table 2 Incision rates of river terraces in Pantang-Heiyukou area

阶地关系	阶地高差/m	阶地年代差/Ma	平均下切速率/(mm·ka <sup>-1</sup> )
T5 至 T4	30	2.230	13
T4 至 T3	50	0.194	258
T3 至 T2	30	0.167	180
T2 至 T1	38	0.480	79
T1 至现今河面	12	0.129	93

- during the Quaternary. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24: 1279–1286
- [9] 袁宝印, 王振海. 青藏高原隆起与黄河地文期. 第四纪研究, 1995(4): 353–359
- [10] Lin A M, Yang Z Y, Sun Z M, et al. How and when did the Yellow River develop its square bend. *Geology*, 2001, 29(10): 951–954
- [11] 刘运明, 李有利, 吕红华, 等. 黄河山陕峡谷保德–克虎段高阶地砾石层的初步研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(6): 808–815
- [12] 邱维理, 张家富, 周力平, 等. 山西河曲黄河阶地序列初步研究. 第四纪研究, 2008, 28(4): 544–552
- [13] Zhang J F, Qiu W L, Li R Q, et al. The evolution of a terrace sequence along the Yellow River (HuangHe) in Hequ, Shanxi, China, as inferred from optical dating. *Geomorphology*, 2009, 109: 54–65
- [14] 程绍平, 邓起东, 闵伟, 等. 黄河晋陕峡谷河流阶地和鄂尔多斯高原第四纪构造运动. 第四纪研究, 1998(3): 238–248
- [15] 张珂, 蔡剑波. 黄河黑山峡口最高阶地宇宙核素的初步年龄及所反映的新构造运动. 第四纪研究, 2006, 26(1): 85–91
- [16] 邢成起, 尹功明, 丁国瑜, 等. 黄河黑山峡阶地的砾石  $Ca$  膜厚度与粗碎屑沉积地貌面形成年代的测定. 科学通报, 2002, 47(3): 167–172
- [17] Heslop D, Langereis C G, Dankers M J. A new astronomical timescale for the loess deposits of Northern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 184: 125–139
- [18] 曹新光. 黄河中游黑峪口–张家湾地区低级河流阶地及典型剖面上覆黄土堆积物研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012
- [19] 朱照宇. 黄河中游河流阶地的形成与水系演化. 地理学报, 1989, 44(4): 429–440
- [20] 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985
- [21] Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(B4): 6093–6095
- [22] 刘维明, 张立原, 孙继敏. 高分辨率洛川剖面黄土磁性地层. 地球物理学报, 2010, 53(4): 888–894
- [23] Pan B T, Hu Z B, Wang J P, et al. A magnetostratigraphy record for landscape development in the eastern ordos Palteau, China: transition from Late Miocene and Early Pliocene stacked sedimentation to Late Pliocene and Quaternary uplift and incision by the Yellow River. *Geomorphology*, 2011, 125: 225–238
- [24] 鹿化煜, 安芷生, 王晓勇, 等. 最近 14 Ma 青藏高原东北缘阶段性隆升的地貌证据. 中国科学: D 辑, 2004, 34(9): 855–864
- [25] 陈晓龙, 范天来, 张复, 等. 鄂尔多斯高原周缘黄河阶地的形成与青藏高原隆升. 地理科学进展, 2013, 32(4): 595–605
- [26] 潘保田, 苏怀, 胡春生, 等. 兰州地区 1.0 Ma 黄河阶地的发现和 0.8 Ma 阶地形成时代的重新厘定. 自然科学进展, 2006, 16(11): 1411–1418
- [27] 潘保田, 苏怀, 刘小丰, 等. 兰州东盆地最近 1.2 Ma 的黄河阶地序列与形成原因. 第四纪研究, 2007, 27(2): 172–180
- [28] 苏怀, 王均平, 潘保田, 等. 黄河三门峡至扣马段的阶地序列及成因. 地理学报, 2008, 63(7): 744–750
- [29] 胡春生, 潘保田, 苏怀, 等. 兰州盆地黄河 800 ka BP 阶地的发现及其古地磁年代. 地理科学, 2009, 29(2): 278–292